Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, професору
Климашу М.М.

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри телекомунікацій Навчально-наукового Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка» к.т.н., Пиріг Юлії Володимирівни на дисертаційну роботу Хільчука Миколи Олександровича на тему "Функціональне інтегрування в сигнальних перетворювачах фотовольтаїчних сенсорних пристроїв з оптичною телекомунікацією", яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

1. Актуальність теми дисертації

Фотовольтаїчні сенсорні пристрої виконують ключову роль у високотехнологічних системах сучасної сенсорної електроніки. Зростання вимог до безпровідних мереж та Інтернету речей (IoT) спричиняє потребу в розробці енергоефективних та самостійних сенсорів, які можуть використовувати відновлювальні джерела енергії. Фотовольтаїчні сенсори набувають широкої популярності, оскільки вони можуть використовувати сонячну енергію для живлення, уникнувши проблем, пов'язаних із заміною батарей або підключенням до мережі. Застосування фотовольтаїчних сенсорних пристроїв також виходить за рамки простої енергонезалежності. Їх можливості поєднання функцій фотоперетворення та сигнального перетворення в єдиному пристрої відкривають нові перспективи для інтеграції в електронні системи. Це сприяє не лише підвищенню продуктивності, але й розширенню можливостей використання сенсорної електроніки в різних областях, включаючи медицину, промисловість та наукові дослідження.

У сучасній області сенсорної електроніки виникає важливе завдання адаптації методів та засобів сигнального перетворення фотоелектронних сенсорів для їхнього подальшого вдосконалення в контексті концепцій Інтернету речей (IoT) та Індустріального Інтернету речей (IIoT) у безпровідних мережах WSN (безпровідних сенсорних мережах). У рамках інфокомунікаційних систем ці пристрої відомі як сенсорні вузли та часто

характеризуються термінами "Розумні сенсори" (Smart Sensor), "Розумний пил" (Smart Dust) та "Лабораторія на чіпі" (Lab-on-Chip).

В сенсорній електроніці виникає важливе завдання адаптації сигнального перетворення фотоелектронних сенсорів для їхнього вдосконалення в контексті Інтернету речей (IoT) та Індустріального Інтернету речей (IIoT) у безпровідних мережах WSN. Розумні сенсори взаємодіють в реальному часі, забезпечуючи збір та обробку даних за допомогою ряду технологічних засобів та методів. Реальний час вимагає мінімізації затримок у взаємодії між сенсорами та системами обробки даних. Використання безпровідних комунікаційних технологій, таких як Bluetooth, Wi-Fi чи спеціалізовані мережі для обміну інформацією між розумними сенсорами сприяє швидкій передачі даних у реальному часі.

Сучасні «Розумні сенсори» повинні бути оснащені вбудованими алгоритмами обробки даних, що дозволяє їм виконувати часткову обробку прямо на місці збору даних. Це допомагає зменшити обсяг передаваної інформації та оптимізувати роботу системи в реальному часі. Застосування сенсорів, які можуть здійснювати вимірювання з високою частотою оновлення, щоб надавати точні дані в реальному часі теж є актуальним завданням.

Разом із розвитком інформаційних технологій, особливо в рамках Інтернету речей (IoT), зростають вимоги до сенсорної електроніки. Сучасні сенсори відзначаються компактністю, можливістю працювати від низькопотужних джерел живлення з обмеженим енергоспоживанням, а також програмованою реконфігурацією та багатофункціональністю. Адаптація сигнальних перетворювачів для використання в системах на кристалі є актуальним завданням. Використання функціонального інтегрування кіл фотоперетворювачів у контексті злиття даних виявляється ефективним методом модифікації сигнальних перетворювачів.

2. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота Хільчука М.О. стосується розв’язання наукового завдання - розширення функціональності та підвищення ефективності сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією.

Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 139 сторінок основного тексту, 136 рисунків, список використаних джерел із 182 найменувань

У **вступі** дисертаційної роботи подано загальну характеристику дослідження, обґрунтовано актуальність обраної теми та сформульовано мету дослідження з визначенням завдань для досягнення поставленої мети. Також відзначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** виконано аналіз тенденцій розвитку методів та засобів сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях бездротових мереж WSN в концепції Інтернету Речей. Виділено "сенсорні вузли" або "Sensor Node" у сфері інфокомунікаційних систем, охоплюючи концепції "Розумних сенсорів" або "Smart Sensors" з безпровідною оптичною комунікацією. Надано приклади використання "Розумних сенсорів" у поєднанні з безпровідним оптичним зв'язком. Визначено завдання покращення параметрів сигнальних перетворювачів фотовольтаїчних сенсорних пристроїв із оптичною телекомунікацією, враховуючи вимоги до фотоперетворювачів фотовольтаїчних кіл живлення та оптичних перетворювачів формування інформативних сигналів.

У **другому розділі** представлено функціональне інтегрування у фотоелектронних сенсорах, включаючи оптимізацію режимів фотовольтаїчного живлення та режимів живлення сигнальних перетворювачів. Розроблено SPICE-моделі для ефективності перетворення енергії фотовольтаїчного джерела живлення, первинного перетворювача фотодіодного типу та компонентів сигнального тракту. Введено принцип функціонального інтегрування LCPS (Light Communication Power and Sensing) , який об'єднує сигнальні перетворювачі фотосенсорики, фотовольтаїчне живлення та оптичний зв'язок. Проведено аналіз втрат перетворення потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального відбору енергії.

У **третьому розділі** виконано поставлене завдання адаптації сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією, включаючи параметричний аналіз трансімпедансних підсилювачів та гіраторів. Розроблено алгоритмічно-схемне рішення селектора керуючих імпульсів у колі фотовольтаїчного живлення.

У **четвертому розділі** роботи проведено верифікацію запропонованих рішень та апробацію їх результатів. Розроблено макет реконфігурованої та програмно керованої платформи для прототипування сигнальних перетворювачів LCPS. Тестування пройшов сигнальний перетворювач PIT, що втілює програмовані вузькосмуговий та широкосмуговий сигнальні тракти трансімпедансного типу. Вузькосмугові тракти забезпечують частотну селективність інформативного сигналу та високу завадостійкість, тоді як широкосмугові тракти забезпечують лінійність перетворення в широкій смузі

частот, вирішуючи завдання дослідження спектральних характеристик речовин, калібрування сенсорів та інтеграції інтелектуальних функцій самодіагностики.

Також розроблено та протестовано фронт-енд змішаного сигнального перетворення PTIC (Programmable Trans-Impedance Convertor), що об'єднує функції трансімпедансного підсилення та програмно-керованого інтегрування. За концепцією злиття даних (Data Fusion) забезпечено формування масиву результатів вимірювального перетворення при перемиканні режимів роботи PTIC з інверсією напруги на інтегруючому конденсаторі. Використовуючи цей масив та відповідні алгоритми корекції паразитних дрейфів схеми інтегрування, можна відділити корисну та паразитну складові сигналу.

Висновки до дисертації включають узагальнені результати дослідження та рекомендації щодо їх практичного застосування. В додатку до роботи подано акт впровадження її результатів.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність

Достовірність та наукова обґрунтованість висновків і рекомендацій, які представлені у дисертаційній роботі Хільчука Миколи Олександровича, підтверджуються застосуванням відповідних теоретичних і експериментальних методів досліджень. Використання математичного моделювання та SPICE моделювання надає необхідну наукову основу для сформульованих наукових положень. Акт впровадження результатів досліджень свідчить про практичну реалізацію отриманих висновків у реальному середовищі. Такий підхід забезпечує цілісність та автентичність дисертаційної роботи, підсилюючи її значущість у науковому дискурсі.

4. Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій.

У ході розв'язання поставленої наукової задачі здобувачем отримані наступні основні наукові результати:

1. Сформульовано принцип функціонального інтегрування LCPS (Light Communication & Powering & Sensing), що поєднує сигнальні перетворювачі фотосенсорики, фотовольтаїчного живлення та оптичного безпровідного зв'язку. Вирішено завдання з розроблення, параметричного аналізу та модифікування базових вузлів фронт-енду змішаного сигнального перетворення (Mixed Signal Fron-end) LCPS пристроїв. Створено макет LCPS пристрою.
2. В розвиток методу трекінгу точки максимальної енергії MPPT (Maximum Power Point Tracking) проведено аналіз втрат перетворення

потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального відбору енергії. Розроблено імітаційні SPICE моделі перетворення енергії фотовольтаїчного джерела та первинного перетворювача фотодіодного типу.

3. З метою подальшого розвитку сигнальних перетворювачів фотоелектронних сенсорних пристроях з оптичною телекомунікацією проведено параметричний аналіз їх базових вузлів трансімпедансних підсилювачів, гіраторів та інтеграторів. Показано, що основним недоліком сигнального перетворення фотоелектронних сенсорних пристроїв є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Вирішення вищезгаданого завдання з покращення частотної селекції передбачає використання перетворювачів на основі гіраторів – схем конверсії реактивного імпедансу, що синтезують реактивне навантаження індуктивного типу з використанням ємнісних компонентів.
4. З метою розширення функціональності фотоелектронних сенсорних пристроїв розроблено та апробовано сигнальний перетворювач PIT (Programmable Impedance Transducer), в якому синтезуються програмовані вузькосмуговий NBT (Narrow Band Transducer) та широкосмуговий WBT (Wide Band Transducer) сигнальні тракти трансімпедансного типу.
5. Розроблено та протестовано фронт-енд змішаного сигнального перетворення PTIC (Programmable Trans-Impedance Convertor), який комбінує можливості трансімпедансного перетворення та програмно керованого інтегрування.

5. Практична значимість результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі наукові висновки вказують на практичну корисність та можливість їхнього застосування для інтеграції фотовольтаїчних сенсорних пристроїв в надвеликі інтегральні мікросхеми. Крім того, результати відкривають перспективи розширення функціональності та підвищення ефективності сигнального перетворення у фотоелектронних сенсорних пристроях з використанням оптичної телекомунікації.

Зокрема :

1. Застосування розробленого методу відслідковування точки максимальної енергії у DC-DC конвертерах напруги, в рамках розробленої імітаційної SPICE моделі, призвело до незначного

підвищення коефіцієнта корисної дії фотовольтаїчного джерела живлення.

2. Реалізація розробленого та протестованого фронт-енду змішаного сигнального перетворення призвела до підвищення точності аналого-цифрового перетворення для кондиціонування сигналу до 17%, залежно від смуги частот одиничного підсилення. Використання цього пристрою дозволило створити масив результатів вимірювань, реалізуючи перемикання режимів PTIC зі зміною напрямку напруги на інтеграційному конденсаторі. З використанням отриманого масиву даних та відповідних алгоритмів корекції відхилень від ідеальних значень, вдалося відокремити корисну та паразитну складові сигналу.

6. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

За результатами досліджень, у 10 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science, 2 – у збірниках матеріалів доповідей всеукраїнських конференцій, 2 – у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, індексованих у наукометричній базі Scopus та Web of Science.

7. Відповідність теми дисертації профілю спеціальності

Дисертація Хільчука М.О. повністю відповідає стандарту спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

8. Відсутність порушення академічної доброчесності.

Під час ретельного аналізу дисертаційної роботи не виявлено жодних підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача. Згідність тексту дисертації з науковими працями дисертанта свідчить про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей та методів, які стосуються тематики інших робіт, містить відповідні посилання.

9. Зауваження до дисертаційної роботи

1. Здебільшого в роботі проводиться параметричний аналіз сигнальних кіл лише з врахуванням операційних підсилювачів. Нажаль, практично не приділено уваги впливу інших важливих компонентів сигнальних кіл, зокрема, комутаторів аналогового сигналу. В ряді задач вплив параметрів таких

комутаторів, зокрема їх опір у відкритому стані, прохідна та частотна характеристики, є визначальними, а, отже, потребує більш детального аналізу.

2. Серед результатів дисертаційної роботи вказується, що «В розвиток методу трекінгу точки максимальної енергії MPPT проведено аналіз втрат перетворення потужності фотовольтаїчного джерела живлення на робочу точку оптимального відбору енергії. Проведення такого аналізу забезпечує можливість підвищити ефективність фотовольтаїчного живлення з врахуванням втрат в DC-DC конвертерах». Однак, відсутні кількісні характеристики запропонованого підходу підвищення ефективності фотовольтаїчного живлення.

3. В ряді, отриманих автором, результатів досліджень практично відсутній їх аналіз. Зокрема, на рис. 2.32 наведено сімейство функціональних залежностей енергетичної ефективності перетворювача фотовольтаїчного джерела без опису при яких умовах отримані ці результати. В таких сімействах кожній з залежностей необхідно присвоювати відповідні вхідні дані.

4. Приклад, представлених на рис. 4.19, результатів досліджень на on-line платформі Tools.Analog є доволі типовим, що робить ці дані несуттєвими для представлення у дисертаційній роботі.

5. Наведені на рис. 4.7 спеціалізовані апаратно-програмні модулі сенсорики в складі PSoC є загально відомими, а їх роль у вирішуваних задачах є неочевидною.

6. Наведений на рис. 4.2 приклад реалізації блок-схеми фронт-енду змішаного сигнального перетворення фотоелектроних сенсорів на основі PSoC місить лише набір функціональних вузлів без їх взаємодії. Зокрема, не представлені сигнальні кола підсилювача з програмованим коефцієнтом підсилення PGA та трансімпедансного підсилювача TIA. Це обмежує сприйняття схеми пристрою в цілому.

7. Представлені в роботі результати модельних досліджень в ряді випадків потребують більш детального аналізу з точки зору доцільності та значимості цих досліджень (зокрема рис. 2.38 – рис. 2.40).

Висловлені зауваження і побажання не знижують загальної високої оцінки проведеного дослідження.

10. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Анотація дисертації розкриває повний зміст дослідження, яке відповідає всім вимогам для отримання наукового ступеня доктора філософії. Робота є завершеною, якісно виконаною та належно оформленою. Стиль подання матеріалів досліджень, наукових тверджень, висновків і рекомендацій спрямований на максимальну доступність сприйняття.

11. Загальні висновки

1. На підставі розгляду змісту дисертації, праць здобувача, акту впровадження, аналізу ступеня новизни наукових положень та практичної значимості отриманих у роботі результатів, висновків та рекомендацій можна зробити висновок, що дисертаційна робота Хільчука Миколи Олександровича «Функціональне інтегрування в сигнальних перетворювачах фотовольтаїчних сенсорних пристроїв з оптичною телекомунікацією» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові наукові результати, які забезпечили розв'язання поставленого в дисертації актуального наукового завдання в галузі телекомунікацій та радіотехніки.

2. Дисертаційна робота за змістом та оформленням відповідає встановленим вимогам. Результати дисертаційної роботи достатньо повно представлені у фахових наукових виданнях та апробовані на конференціях.

3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор – Хільчук Микола Олександрович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Рецензент
кандидат технічних наук,
доцент кафедри телекомунікацій
Навчально-наукового Інституту
телекомунікацій, радіоелектроніки та
електронної техніки
Національного університету
«Львівська політехніка» Юлія ПИРІГ

Підпис к.т.н., Пиріг Ю.В. засвідчую

Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»
к.т.н., доцент Роман БРИЛИНСЬКИЙ